

Д. т. н. С. Я. Давыдов (✉), д. т. н. Н. П. Косарев, д. т. н. Н. Г. Валиев,
д. т. н. Г. А. Боярских, М. С. Филатов

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»,
г. Екатеринбург, Россия

УДК 669.162.244.6

ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ТРУБЧАТЫХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

Дано описание конструкций трубчатых ленточных конвейеров с роликами сферической формы. Рассмотренные функциональные взаимосвязи триботехнических узлов таких конвейеров позволяют определить энергетические потери на трение и изнашивание ресурсных элементов, установить их долю при трении качения и скольжения и определить значимость каждого технического и технико-экономического критерия конкурентоспособности альтернативных вариантов трубчатых ленточных конвейеров.

Ключевые слова: *трубчатые ленточные конвейеры, ролики, сферическая форма, цилиндрическая форма, триботехнические элементы, энергозатраты.*

В различных отраслях промышленности нашли широкое применение трубчатые ленточные конвейеры (ТЛК), обеспечивающие защиту окружающей среды вследствие транспортирования груза в замкнутом объеме.

Особенность зарубежных ТЛК состоит в том, что конвейерная лента сворачивается в трубу, а ее края образуют в верхней части трубчатой поверхности зону перекрытия (края ленты перекрывают друг друга внахлест), в которой находится транспортируемый материал. Величина зоны перекрытия зависит от типа ленты, насыпной плотности и крупности кусков транспортируемого материала, шага установки роликкоопор [1–7].

Закрытая система обеспечивает экологическую приспособленность к окружающей среде и возможность устройства трассы с изгибами в трехмерном пространстве, а также гарантирует надежную транспортировку грузов разных плотностей, влажности, размера частиц.

Конвейерную ленту, сформированную в трубу, можно изгибать в трехмерном пространстве, что дает возможность проектировать конвейерную систему на базе непрерывной ленты без дополнительных пересыпных станций. Скорость трубчатой конвейерной ленты может значительно превышать скорость обычной ленты. Трубчатая форма обеспечивает меньшее провисание между роликкоопорами и герметизацию груза, исключая его просыпь.

Промышленное применение трубчатых конвейеров показало, что обжимные ролики с за-

труднением вписываются в поперечное сечение этих конвейеров. При любом незначительном перекосе установленных обжимных роликов относительно движущейся ленты возникают значительные силы сопротивления их вращению. Происходит это за счет создания трения между их поверхностями триботехнической системы, влияющего на коэффициент трения, это, в свою очередь, отражается на энергозатратах, долговечности и безотказности конструктивных элементов конвейера.

Известно много исследований, посвященных изучению контактного взаимодействия ленты с роликами. Для сравнительной оценки воспользуемся изученными исследованиями напряжения и деформации на участке плоского расположения ленты [8].

Были рассмотрены напряжения и деформации, возникающие в зоне контакта ленты с роликом, в предположении, что нагрузка неравномерно распределена по образующей ролика [8]. Использовано следующее допущение: результирующая боковая сила F_6 некоторых сил обеспечивает равномерное поступательное движение ленты со скоростью v , направленной под углом α к прямой, перпендикулярной оси ролика (рис. 1). Угол α складывается из угла Ω перекоса относительно оси X конвейера и угла β между направлением абсолютной скорости ленты и осью X конвейера. Результирующая сила F_6 уравнивается силой F_7 трения контактирующих поверхностей, направленной вдоль образующей ролика, и силой W_0 сопротивления движению. Приблизительно можно считать, что сила W_0 направлена перпендикулярно образующей.

Считали также, что деформации имеют место только по толщине контактирующей нижней обкладки ленты и футеровки ролика в пределах



С. Я. Давыдов

E-mail: davidovtrans@mail.ru

зоны контакта (рис. 2). Тогда точки, принадлежащие нижней поверхности ленты, входя в контакт с роликами, сдвигаются по окружности ролика и смещаются вдоль его образующей по некоторому закону $\Delta_n(\xi, z)$.

При этом точки на поверхности футеровки также смещаются вдоль образующей по закону $\Delta_\phi(\xi, z)$. Соотношение между Δ_n и Δ_ϕ может быть найдено из условия равенства касательных напряжений на границе контакта ленты и футеровки:

$$G_n \Delta_n / h_n = G_\phi \Delta_\phi / h_\phi,$$

где G_n и G_ϕ — модули сдвига; h_n и h_ϕ — толщина нижней обкладки ленты и футеровки соответственно.

При отсутствии скольжения ленты относительно ролика (как вдоль образующей, так и перпендикулярно ей) функции Δ_n и Δ_ϕ изменяются по следующему закону:

$$\Delta_n + \Delta_\phi = \xi \operatorname{tg} \alpha.$$

Отсутствие проскальзывания ленты вдоль образующей ролика определяется условием не превышения касательными напряжениями на границе контакта удельных сил трения покоя:

$$G_n \Delta_n(\xi, z) / h_n \leq f_0 \sigma(\xi, z), \quad (1)$$

где f_0 — коэффициент трения покоя; $\sigma(\xi, z)$ — нормальные напряжения в контакте, распределенные по определенному закону.

При нарушении условия (1) наступает проскальзывание контактирующих поверхностей и смещение Δ_n определяется из соотношения

$$G_n \Delta_n(\xi, z) / h_n = f_{ск} \sigma(\xi, z),$$

где $f_{ск}$ — коэффициент трения скольжения.

С другой стороны, если бы ролик, катящийся по основанию, не испытывал проскальзывания, то такое движение было бы чистым качением и путь, проходимый любой точкой поверхности ролика по ленте за один оборот, составлял бы $2\pi r$. Однако качения без проскальзывания не бывает. Ролики и лента испытывают упругие деформации. При этом ролики в зоне контакта сжимаются, а лента — растягивается (рис. 3) [9].

Поэтому на контакте постоянно происходит проскальзывание ролика относительно ленты. Это один из источников рассеяния энергии. Другим источником является упругое поведение мате-

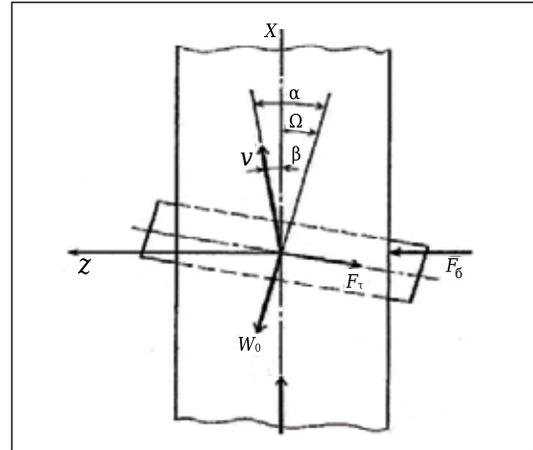


Рис. 1. Схема зоны контакта ленты с роликом: z — координата вдоль образующей ролика; v — скорость поступательного движения ленты; F_0 — результирующая боковая сила; F_τ — сила трения; W_0 — сила сопротивления движению

риалов ленты и ролика. Если лента не движется, то дуга контакта симметрична (см. рис. 3, а) и реакция ленты соосна с нормальной нагрузкой. При движении ленты зона контакта искажается (см. рис. 3, б). Материал позади ролика не успевает восстановить форму. Эпюра давлений смещается

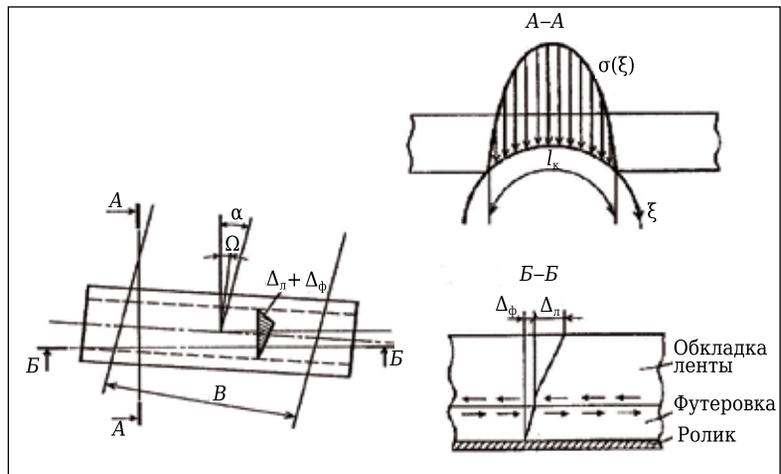


Рис. 2. Основные соотношения при движении ленты по ролику: B — ширина ленты; l_k — длина дуги обхвата лентой ролика; ξ — подвижная криволинейная координата, совмещенная с образующей ролика

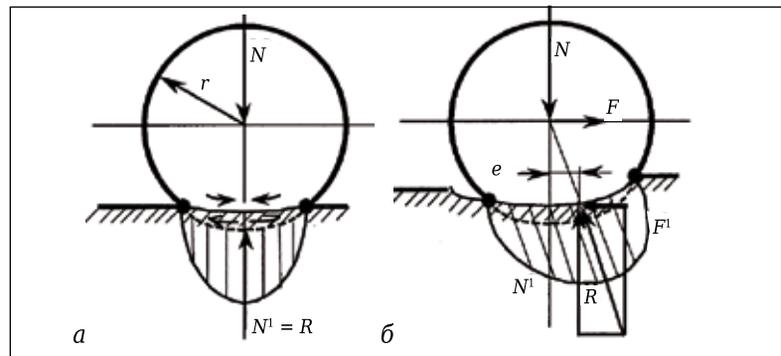


Рис. 3. Взаимодействие ролика с лентой: а — дуга контакта симметрична при покое ленты; б — искажение зоны контакта при движении ленты

в сторону движения. Большая часть дуги контакта оказывается во фронтальной части. Реакция опоры распределяется на две составляющих: вертикальную ($N^1 = -N^1$) и горизонтальную (F^1), которая представляет собой сопротивление перекатыванию.

Поскольку из условия равновесия $Ne = Fr = M$, то коэффициент трения качения

$$\mu_k = M/N = e,$$

где e — эксцентриситет — смещение центра опорной поверхности от вертикали (см. рис. 3, б); M — момент трения; r — радиус ролика.

Наряду с этой характеристикой используется коэффициент сопротивления качению, равный отношению работы на единичном пути к нормальной нагрузке. Работа при повороте на угол $d\varphi$ равна $Md\varphi$, а пройденный путь — $\Delta l = rd\varphi$. Тогда коэффициент сопротивления

$$K_c = Md\varphi/(Nrd\varphi) = e/r.$$

Это выражение показывает, что эксцентриситет не является константой и $K_c \approx 1/r^n$, причем $n < 1$ [9].

При этом в данном случае главный источник потерь — упругие деформации ролика и прорезиненной ленты. Рассеивание энергии связано в основном с гистерезисом деформации. Исходя из этих соображений, для цилиндрического ролика

$$\mu_k = 0,24\alpha_r(qrj)^{1/2},$$

где α_r — коэффициент гистерезисных потерь в условиях трения, $\alpha_r = 3\alpha$; α — коэффициент гистерезисных потерь, измеренный при циклическом растяжении-сжатии стержня; q — нагрузка, приходящаяся на единицу длины; j — упругая постоянная. Коэффициент гистерезисных потерь вычисляется как доля рассеянной в теплоту энергии за деформационный цикл. Величина α_r для металлов невелика (0,02–0,04), значительно выше для резины (0,08–0,2).

Физический смысл коэффициента трения разный в зависимости от того, рассматривается трение качения или скольжения. Для трения скольжения это отношение силы трения к силе давления. Отношение двух одноименных величин есть величина безразмерная, поэтому коэффициент силы трения скольжения безразмерен.

Сила трения качения зависит не только от давления, материалов и состояния поверхности, но и от радиусов тел качения. Поэтому коэффициент трения качения имеет размерность длины. Его физический смысл — ширина участка деформации, возникающей в районе контакта катящегося тела и поверхности опоры.

Анализ [1–7, 10–22] тенденций развития конкурентоспособных конструкций ТЛК по критерию энергозатрат позволяет выявить существенные недостатки их триботехнических элементов. К наиболее перспективным для мо-

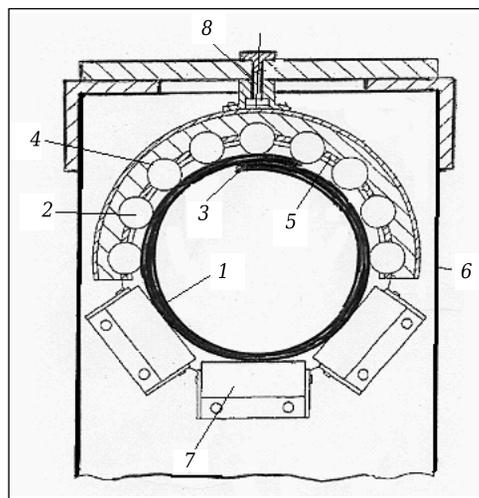


Рис. 4. Трубчатый конвейер [23]: 6 — рама; остальные обозначения — в тексте

дернизации из рассмотренных аналогов можно отнести японский вариант [23]. Он представляет собой (рис. 4) свернутую внахлест ленту и шары, которые установлены в полусферах чашек рамы.

Шары 2 кроме весовой нагрузки от ленты 1 служат направляющими ленты, удерживающими ее в трубчатой форме, обязательно внахлест ее кромок 3. Шары 2 заключены внутри своих чашек 4 в виде вогнутых полусфер, контактируют с ними, фиксируются уплотнительными прокладками и пластинами 5. Пластины 5 находятся в контакте с полусферами, что в сумме вызывает значительное повышение коэффициентов трения, приводящих к интенсивному износу и нагреву поверхностей трения триботехнической системы. Отсутствие зазора между сферами шаров и многочисленными контактными элементами также вызывает значительное повышение коэффициента трения при свободном вращении в любом направлении, что приводит к интенсивному износу схватыванием I и II рода поверхностей трения триботехнической системы и их нагреву. В этих условиях возникает заклинивание в местах контакта поверхностей. Все перечисленное создает дополнительные сопротивления вращению шаров и усложняет конструкцию данного узла. Сопротивление вращению шаров отражается на энергозатратах, а также на долговечности и безотказности конструктивных элементов конвейера. Следует отметить, что необходимость сохранения трубчатой формы ленты и удержания свернутой ленты внахлест намного усложняет конструкцию конвейера, что приводит к отказам ее элементов, переходу режима трения качения к трению скольжения, увеличению площади фактического контакта поверхностей трения и повышению энергозатрат.

В японском патенте [23] дано подтверждение целесообразности замены цилиндрических роликов на ролики сферической формы, что частично решает задачу снижения энергозатрат за счет

снижения площади фактического контакта тел с поверхностью ленты. В данной конструкции ТЛК имеется удачное решение установки рам на вертикальной оси 8 с возможностью вращения вокруг этой оси. Вращающиеся цилиндрические ролики 7 несут весовую нагрузку от ленты 1 и выполняют ориентацию движения ленты против скручивания.

Процесс загиба отечественной конвейерной ленты вокруг продольных волокон прокладок (поперек поперечных волокон утка) в полузамкнутое сечение (трубчатое сечение с зазором между кромками ленты) был изучен и использован в устройствах для ее переворота с помощью прижимных роликов [4–7].

Разработаны и экспериментально обоснованы конструктивные параметры полузамкнутого трубчатого ленточного конвейера с кромками, обращенными вверх, с перекрытием зазора на рабочей ветви ленты. При этом значительно снижаются нагрузки от скручивающего ленту момента, что позволяет увеличить его производительность до 30 % по сравнению с имеющейся при загибе этой же ленты внахлест [4–8, 10–23].

Предлагаемый трубчатый ленточный конвейер (рис. 5) [24, 25] включает завернутую в С-образную форму транспортерную ленту 1, поверх которой установлена охватывающая лента 2.

Охватывающая лента 2, навешенная на свои натяжные барабаны 3 и 4, имеет верхнюю и нижнюю ветви. Нижняя ветвь охватывающей ленты перекрывает зазор между кромками транспортерной ленты 1.

Вокруг завернутой по кольцу рабочей ветви транспортерной ленты 1 и нижней ветви охватывающей ленты 2 установлены опоры в виде кольцевых дисков 5. Кольцевые диски 5 объединены по паре внешними кольцами 6, в полости между которыми вмонтированы ролики, выполненные в виде шаровых поверхностей 7 (шаровые ролики). Шаровые ролики 7 со своими осями вращения вставлены в сепараторы 8. Сепараторы 8 и внешние кольца 6 смонтированы на кольцевых дисках 5.

На порожней ветви ленты 1 между головным и хвостовым отклоняющими барабанами 10 и 11 смонтированы вокруг нее кольцевые диски 5. Кольцевые диски 5 предназначены для винтового с С-образным сечением переворота 12 порожней ветви ленты после головного отклоняющего барабана 10 и возвращения в исходное ее состояние перед хвостовым отклоняющим барабаном 11.

Направляющие ролики 13 и 14 установлены в зазоре 15 между кромками свернутой порожней ветви ленты. Направляющий ролик 13 предназначен для переворота ленты грязной стороной вверх, а направляющий ролик 14 — для разворота ленты в первоначальное состояние. Между направляющими роликами 13 и 14 по всей трассе конвейера порожняя ветвь ленты 1 имеет свернутое С-образное сечение с кромками, расположенными вверх при помощи шаровых роликов 7 кольцевых дисков 5, установленных на определенном расстоянии друг от друга.

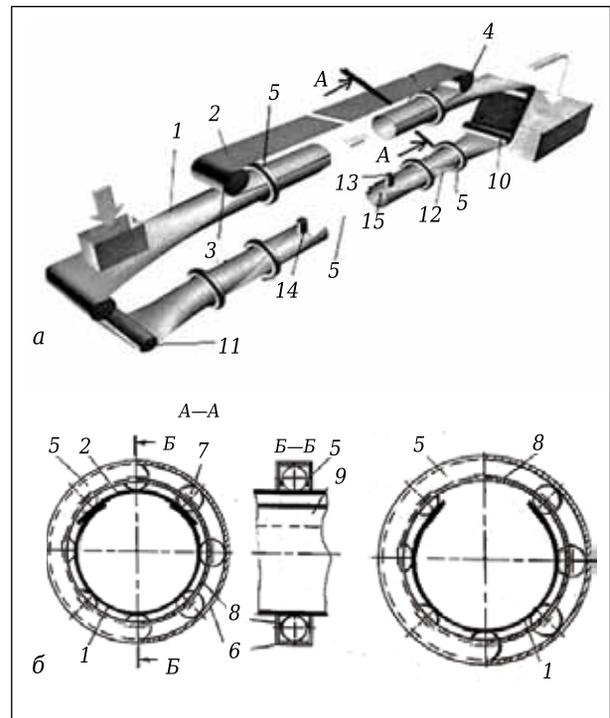


Рис. 5. Трубчатый ленточный конвейер с использованием шаровых роlikоопор: а — общий вид конвейера; б — сечение порожней ветви ленты в промежутке между направляющими роликами: 9 — труба; 12 — узел поворота; остальные обозначения — в тексте

На грузовой ветви конвейера [25] сепараторы смонтированы между центрами вращения шаров и диаметром трубы обеих свернутых лент, на порожней ветви — между центрами вращения шаров и свернутой до С-образного сечения лентой, причем внутренние стенки внешнего кольца, кольцевого диска и сепаратора по ходу движения лент в месте контакта шаров снабжены антифрикционными вставками.

Распорные усилия от свернутых лент 1 и 2 грузовой ветви и от свернутой до С-образного сечения порожней ветви ленты воспринимаются через шаровые ролики 7 внешними кольцами 6. При возможности свободного вращения в любом направлении шаровых роликов 7 отпадает необходимость их центрирования, что упрощает их монтаж и значительно уменьшает сопротивление триботехнической системы при взаимодействии с лентой за счет минимизации составляющей трения. Отсутствие возможных перекосов при установке шаровых роликов также положительно отражается на экономии энергозатрат.

Рассмотренные функциональные взаимосвязи триботехнических узлов ТЛК позволяют установить энергетические потери на трение и изнашивание ресурсных элементов, установить их долю при трении качения и скольжения и определить значимость каждого технического и технико-экономического критерия конкурентоспособности альтернативных вариантов ТЛК.

Библиографический список

1. **Нойманн, Т.** Трубчатые конвейерные ленты ContiTech — превосходное транспортное решение! / Т. Нойманн // Уголь. — 2013. — № 3. — С. 76, 77.
2. **Галкин, В. И.** Особенности эксплуатации трубчатых ленточных конвейеров и ленточных конвейеров с пространственной трассой / В. И. Галкин. — М.: Крокус-Экспо, 2012. — С. 1–27. Mining world-russia.Primexpro.ru/media/47/pdf/
3. **Давыдов, С. Я.** Использование лент общепромышленного назначения для трубчатых ленточных конвейеров / С. Я. Давыдов // Известия Уральского государственного университета. — 2013. — Вып. 4 (32). — С. 59–71.
4. **Давыдов, С. Я.** Трубчатый ленточный конвейер для пылеобразующих материалов с переворотом холостой ветви ленты / С. Я. Давыдов, И. Д. Кащеев, С. Н. Сычёв, С. А. Ляпцев // Новые огнеупоры. — 2010. — № 7. — С. 10–15.
5. **Давыдов С. Я.** Использование лент общепромышленного назначения для трубчатых ленточных конвейеров / С. Я. Давыдов, В. С. Шварев // Новые огнеупоры. — 2014. — № 4. — С. 16–23.
6. **Давыдов, С. Я.** Трубчатый ленточный конвейер с переворотом холостой ветви ленты / С. Я. Давыдов, И. Д. Кащеев, С. Н. Сычёв, С. А. Ляпцев // Новые огнеупоры. — 2010. — № 7. — С. 10–16.
- Davydov, S.** Tubular belt conveyer with turnover of the return run of the belt / S. Davydov, I. Kashcheev, S. Sychev, S. Lyaptsev // Refractories and Industrial Ceramics. — 2010. — Vol. 51, № 4. — P. 250–255(6).
7. **Давыдов, С. Я.** Энергосберегающее оборудование для транспортировки сыпучих материалов: исследование, разработка, производство / С. Я. Давыдов. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. — 317 с.
8. **Галкин, В. И.** Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий / В. И. Галкин, В. Г. Дмитриев, И. В. Запенин, Е. Е. Шешко. — М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2005. — 543 с.
9. **Беркович, И. И.** Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: учебник для вузов / И. И. Беркович, Д. Г. Громаковский. — Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2000. — 268 с. (<http://helpiks.org/4-4161.html>)
10. **Пат. 2019476 RU.** Ленточный конвейер / Давыдов С. Я., Демидов А. Е., Федоров А. Ф., Кабанов В. И. — № 4860663; заявл. 29.05.90; опубл. 15.09.94, Бюл. № 17.
11. **Пат. 1569307 SU.** Установка для транспортирования сыпучего материала / Давыдов С. Я., Детков С. П., Мальцев А. М., Галкин А. М. — № 4466641; заявл. 26.07.88; опубл. 07.06.90, Бюл. № 21.
12. Разработать и внедрить конвейер с трубчатой лентой на базе существующего: отчет о НИР НИИ Энергоцветмет; рук. С. Я. Давыдов. — Екатеринбург, 1992. — 23 с.
13. **Давыдов, С. Я.** Определение длины изгиба с переворотом прорезиненной конвейерной ленты до С-образного расположения ее кромок / С. Я. Давыдов, И. Д. Кащеев, А. Ю. Селезнева // Новые огнеупоры. — 2010. — № 4. — С. 30, 31.
14. **Давыдов, С. Я.** Ленточный конвейер для транспортирования пылеобразующих материалов / С. Я. Давыдов, И. Д. Кащеев, О. Ф. Валеев, С. В. Малагамба // Новые огнеупоры. — 2003. — № 2. — С. 17–21.
15. **Давыдов, С. Я.** Энергосберегающий и экологичный транспорт / сб. материалов Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции и выставки студентов / С. Я. Давыдов, В. И. Малагамба, С. В. Малагамба. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003. — С. 156–158.
16. **Пат. 2220088 РФ.** Ленточный конвейер / Давыдов С. Я. — № 99114931; заявл. 07.07.99; опубл. 27.12.03, Бюл. № 36.
17. **Давыдов, С. Я.** Уменьшение пылеобразования на конвейерном транспорте / С. Я. Давыдов, Г. Э. Вебер, О. Ф. Валеев // Изв. вузов. Горный журнал. — 2004. — № 2. — С. 65–70.
18. **Давыдов, С. Я.** Энергосберегающий трубчатый ленточный конвейер / С. Я. Давыдов, И. Д. Кащеев, С. В. Малагамба // Новые огнеупоры. — 2004. — № 8. — С. 33–35.
19. **Пат. 2264966 РФ.** Ленточный конвейер / Давыдов С. Я., Волков Д. Н., Кобелев В. А., Шунин Р. В. — № 2004116731; заявл. 01.06.04; опубл. 27.11.05, Бюл. № 33.
20. **Давыдов, С. Я.** Определение радиуса загиба ленты энергосберегающего трубчатого ленточного конвейера. Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии // Сб. материалов Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции / С. Я. Давыдов, Е. В. Мастерова. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. — С. 36–39.
21. **Давыдов, С. Я.** Трубчатый ленточный конвейер для пылеобразующих материалов / С. Я. Давыдов, Г. Э. Вебер, Е. В. Мастерова // Изв. вузов. Горный журнал. — 2006. — № 2. — С. 98–101.
22. **Давыдов С. Я.** Трубчатый ленточный конвейер для пылеобразующих материалов / С. Я. Давыдов, И. Д. Кащеев, А. Е. Замураев, Е. В. Мастерова // Новые огнеупоры. — 2006. — № 5. — С. 15–17.
23. **Пат. 2006256781 (А) JP.** Трубчатый конвейер / Канесада Мичио. Заявка JP № 20050076335; заявл. 17.03.05.
24. **Пат. 2548218 РФ.** Ленточный конвейер / Давыдов С. Я., Косарев Н. П., Валиев Н. Г., Боярский Г. А. — № 2013134805; заявл. 23.07.13; опубл. 20.04.15, Бюл. № 11.
25. **Пат. 157392.** Ленточный конвейер с трубчатым сечением лент / Давыдов С. Я., Афанасьев А. И. — № 2015131190; заявл. 27.07.15; опубл. 27.11.15, Бюл. № 33. ■

Получено 07.06.16

© С. Я. Давыдов, Н. П. Косарев, Н. Г. Валиев, Г. А. Боярских, М. С. Филатов, 2016 г.